

Meranie vibrácií odpružených hmôt  
automobilu pomocou MEMs akcelerometrov  
MEMs Accelerometers Used for Measurement  
of Vibration of Vehicle Sprung Mass

Poslucháč: Jakub Ďudák

Vedúci bakalárskej práce: prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.

Dátum odovzdania práce: 23. 5. 2011

### **Pod'akovanie**

Ďakujem prof. Ing. Jiřímu Tůmovi, CSc. za  
odborné a metodické vedenie, ktoré mi poskytol  
pri vypracovávaní bakalárskej práce.

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave : .....

.....

Jakub Ďudák

## Prehlasujem, že

- bol oboznámený s tým, že na moju diplomovú (bakalársku) prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Zb. – autorský zákon, najmä §35 – použitie práce v rámci občianskych a náboženských obradov v rámci školských predstavení a použitie ako školskej práce a §60 – školská práca.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo neziskovo ku svojej vnútornej potrebe diplomovú (bakalársku) prácu použiť (§35 odst. 3).
- Súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej (bakalárskej) práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej (bakalárskej) práce. Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej (bakalárskej) práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- Bolo dohodnuté, že s VŠB-TUO v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením používať prácu v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bolo dohodnuté, že použiť svoju prácu – diplomovú (bakalársku) prácu, alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie práce vynaložené (až do plnej výšky).
- Beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Zb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave:.....

Podpis: .....

Adresa trvalého pobytu:  
Soblahov 479  
913 38 Soblahov

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Akcelerometre MEMs.....	10
2.1	Využitie kremíka v akcelerometroch.....	11
2.2	Snímače využívajúce zotrvačné hmoty.....	12
2.3	Základné typy obalov integrovaných obvodov .....	14
2.4	Plastové obaly.....	16
2.5	Kovové obaly .....	17
2.6	Akcelerometre .....	17
2.7	Piezoelektrické akcelerometre.....	18
2.8	Piezorezistívne akcelerometre .....	19
2.9	Elektrodynamický akcelerometer .....	20
2.10	Rotačný akcelerometer .....	21
2.11	Kapacitný akcelerometer MEMs .....	21
2.12	Technológia HARMENS.....	23
2.13	Externá sériová zbernica SPI .....	24
2.14	Vlastnosti zbernice SPI.....	24
2.15	Klady a zápory zbernice SPI.....	25
2.16	Princíp komunikácie po zbernici SPI .....	26
3	Výber vhodných akcelerometrov pre danú úlohu.....	27
3.1	Akcelerometer MMA 7456 .....	28
3.2	Návrh riešenia systému pre záznam pohybu odpružených hmôt. ....	29
3.3	Riešenie návrhu plošného spoja .....	29
4	Fourierová transformácia .....	31
4.1	Definícia priamej Fourierovej transformácie .....	31
4.2	Implementácia FFT (Fast Fourier Transform) .....	32
4.3	Matematicko – fyzikálny model automobilu .....	34

4.4	Postup prepočtu zrýchlenia na výchylku s korekciou na drift akcelerometra.	35
4.5	Voľba programovacieho jazyka .....	37
4.6	Vlastnosti programovacieho jazyka MATLAB .....	38
4.7	Návrh vyhodnocovacieho softvéru .....	38
4.8	Overenie metódy integrácie .....	39
4.9	Program Signal Analyser .....	40
5	Záver .....	42
	Zoznam použitej literatúry .....	43
	Zoznam príloh .....	45

## **Zoznam použitých skratiek a symbolov**

**CAN** *Controller Area Network - CAN zbernica*

**MEMs** *Micro – Electro - Mechanical Systems- Mikro – elektro - mechynické systémy*

**ESC** *Electronic stability control - elektronická kontrola stability*

**SPI** *Serial Peripheral Interface - Sériové periférne rozhranie*

**I2C** *Inter-Integrated Circuit*

## **Anotácia bakalárskej práce**

Ďudák, Jakub.: *Vytvorenie zariadenia a metódy pre meranie pohybu odpružených hmôt automobilu pomocou MEMs akcelerometrov pre hodnotenie nerovnosti vozoviek*. Ostrava: kat. ATŘ – 352 VŠB-TUO, 2011. 48 s. Bakalárska práca, vedúci: Prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.

Táto práca sa zaoberá témou akcelerometrov, snaží sa podať prehľad o druhoch a princípoch merania zrýchlenia pomocou týchto senzorov. Úlohou práce je naštudovanie informácií, ktoré budú potrebné k zrealizovaniu danej úlohy. Taktiež popisuje princíp MEMs akcelerometra, ktorý sa použije na meranie. Ďalšia kapitola sa zaoberá návrhom vhodného zariadenia, ktoré umožní snímať zrýchlenie z akcelerometra. Popisuje princíp zapojenia jednotlivých súčiastok, aby boli splnené jednotlivé podmienky pre správnu funkčnosť zariadenia. Na konci práce je overená správnosť naprogramovaného softvéru v programovacom prostredí MATLAB pomocou programu Signal Analyser. Ako dôkaz správnosti sú na konci dokumentu zobrazené grafy z obidvoch programov. Taktiež záver práce obsahuje výsledný graf z merania na priemyselnom vibrátore.

## **Annotation of bachelor thesis**

Ďudák, J.: *MEMS Accelerometers Used for Measurement of Vibration of Vehicle Sprung Mass*. Ostrava: Dept. Of Control Systems and Instrumentation – 352 VŠB-TUO, 2011. 48 p. Bachelor Thesis, Supervisor: Prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.

This project contains information about accelerometers and is trying to put light on variety and principles of measuring of an acceleration by these sensors. The aim of this project is to familiarise information, which will be necessary for executing the task. Also describes principle of MEMs accelerometer, which will be used for measuring. A next chapter contains a plan of suitable device, which allows to scan an acceleration from the accelerometer. Describes principle of connection of individual parts to acknowledge conditions for proper functionality of the device. At the conclusion of the project is verified correctness of software programmed in programming scene MATLAB by the program Signal Analyser. As a proof of correctness there are charts shown from both programs at the end of the document including a final chart that contains information about measuring with industrial vibration machine.



# 1 Úvod

Táto práca sa zaoberá témou MEMs akcelerometrov. Podáva prehľad o rôznych typoch akcelerometrov, ich princípoch, a ich využití. Je tu rozobraná téma MEMs akcelerometrov, kde je podrobnejšie vysvetlený ich princíp, zloženie štruktúry. Akcelerometre prešli dlhým procesom vývoja. MEMs akcelerometre sa dnes dostávajú do popredia hlavne vďaka svojim vlastnostiam a rozmerom. Dnes kedy technika ide dopredu míľovými krokmi je ich využitie čoraz častejšie. Nachádzajú uplatnenie v medicíne, v mobilných telefónoch a v automobilových airbagoch.

Ďalšia kapitola práce sa venuje návrhom zariadenia, ktoré bude snímať pohyb odpružených hmôt. Používa sa zvolený typ akcelerometra, podľa ktorého daný systém bol navrhnutý. Zariadenie je vyhotovené tak, aby komunikovalo pomocou zbernice CAN. Zbierajú sa dáta do programu, ktoré sú neskôr v režime offline spracované vykreslením príslušných grafov v čase.

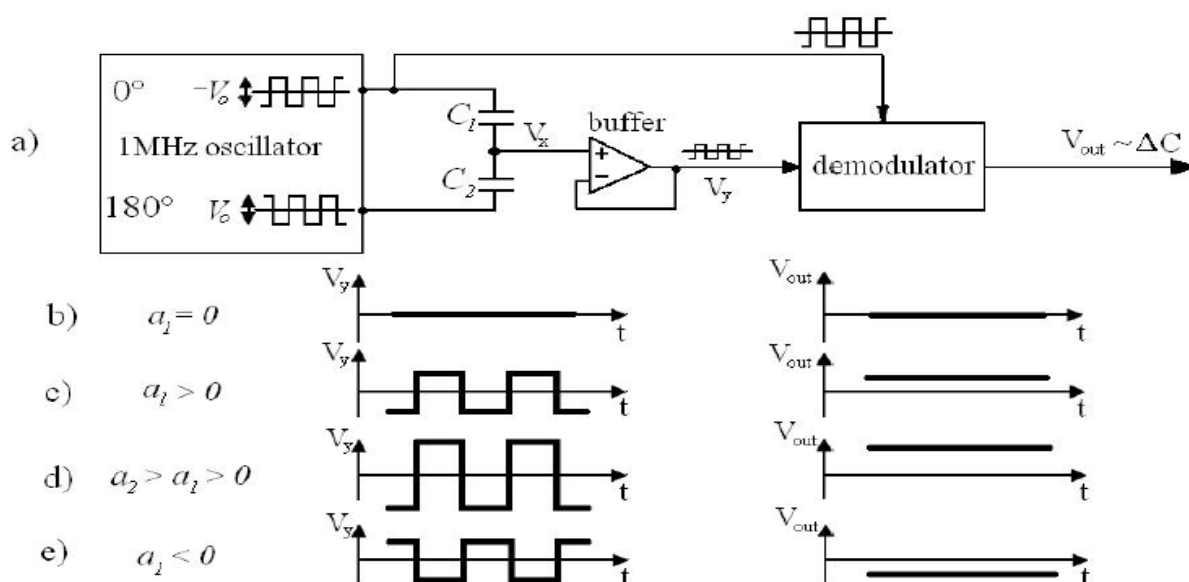
Pre vyhodnocovanie nameraných dát bolo dôležité zvoliť vhodný tip programovacieho jazyka. Pre tento tip aplikácie sa použilo programovacie prostredie MATLAB. Zdrojový kód programu musí prepočítať hodnotu zrýchlenia a hodnotu výchylky. To znamená, že sa musí previesť dvojité integračie. Programovacie prostredie MATLAB má v sebe zabudované hotové naprogramované funkcie. Využil som funkcie Fourierovej transformácie ako aj inverznej Fourierovej transformácie.

Koniec práce sa zaoberá kontrolou správnosti naprogramovaného softvéru. Pre porovnanie výstupných priebehov som využil softvér Signal Analyser. Namerané dáta z priemyselného vibrátora boli vyhodnotené v aplikácii. Výsledkom bol graf závislosti výchylky v čase.

## 2 Akcelerometre MEMs

Akcelerometer je elektromechanické zariadenie, ktoré meria sily zrýchlenia. Tieto sily môžu byť statické, kde je konštantná gravitačná sila alebo dynamická sila spôsobená pohybom prípadne vibráciami. Existuje množstvo akcelerometrov, ktoré sú založené na princípe piezoelektrického kryštálu. Ich nevýhodou je, že majú veľké rozmery. Bola snaha vytvoriť akcelerometre s menšími rozmermi, ktoré by zvýšili použiteľnosť. Začalo sa tak hľadať v oblasti mikroelektroniky. Z tohto vznikli akcelerometre MEMS (mikroelektromechanické systémy). Prvý takýto akcelerometer bol navrhnutý v roku 1979 na Stanfordsej univerzite. Vývoj akcelerometra trval viac ako 15 rokov a stal sa používaným vo väčšine aplikácií. V roku 1990 MEMS akcelerometre zaznamenali revolúciu v automobilovom priemysle v oblasti airbagov. Od tej doby ich unikátne vlastnosti umožnili použitie v notebookových hard diskoch ako ochrana, v herných ovládačoch.

Existujú rôzne spôsoby, ako sú vyrábané akcelerometre. Niektoré akcelerometre využívajú piezoelektrický efekt. Tieto akcelerometre obsahujú mikroskopické kryštálové štruktúry, v ktorých deformácia spôsobuje zmenu napätia. Ďalším typom akcelerometrov sú kapacitné. Kondenzátor môže fungovať ako senzor aj ako aktuátor. Má vynikajúcu citlivosť. Zmena kapacity nie je závislá na základnom materiály, ale na zmene polohy dosky kondenzátora [Beeby, S., a kolektív, 2004].



Obr. 1 a., Elektrický obvod, ktorý meria zrýchlenie pomocou zmeny kapacity; b., ak je zrýchlenie nulové; c., ak je zrýchlenie nenulové; e., ak je zrýchlenie menšie ako nula

[Andrejašič, M., 2008]

## 2.1 Využitie kremíka v akcelerometroch

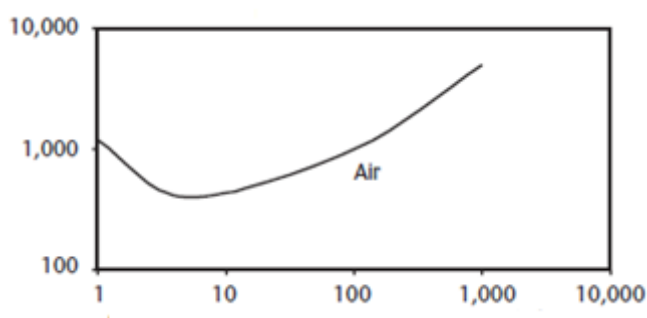
Je preukázané, že kremík sa nachádza v rôznych druhoch materiálov vrátane skla, polymérov, kovov a rôznych zliatin [Beeby, S., a kolektív, 2004].

Hlavné dôvody prečo je kremík používaný:

- má široké uplatnenie v rámci integrovaného obvodu v mikroelektronickom priemysle
- má vhodné elektrické vlastnosti
- lacná výroba
- rozsiahle poznatky o tomto druhu materiálu
- žiaduce mechanické vlastnosti

Posledným bodom sú žiaduce mechanické vlastnosti senzora. Monokryštály kremíka sú elastické až po bod zlomu. Kremík je ľahší ako hliník a má modul pružnosti podobný ako nerezová oceľ. Nerezová oceľ sa používa často pri výrobe mechanických snímačov. Kremík existuje v troch formách:

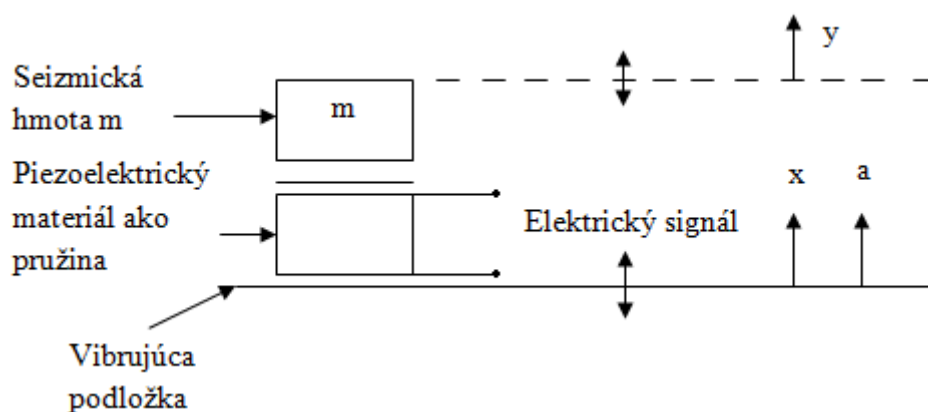
- kryštalický
- amorfny
- polykryštalický



Obr. 2 Paschenova krivka: graf závislosti prieražného napätia (os y) od vzdialenosti elektródy (os x) [Beeby, S., a kolektív, 2004]

## 2.2 Snímače využívajúce zotrvačné hmoty

Snímač je zložený z seizmickej hmoty  $m$ , piezoelektrického materiálu. Namiesto piezoelektrického materiálu môže byť použitý akýkoľvek pružný materiál. Celá sústava leží na vibrujúcej podložke. Piezoelektrický materiál generuje elektrický náboj úmerný veľkosti sily, ktorá na neho pôsobí [Tůma, J., 2009].



Obr. 3 Schematické znázornenie akcelerometra

Tento dej je charakterizovaný pohybovou rovnicou

$$m \frac{dy^2}{dt^2} = k(x - y) + b(\dot{x} - \dot{y}) \quad (1)$$

kde je:  $m$  – hmotnosť [kg],  $y$  - výchylka seizmickej hmoty [m],  $f$  – sila [N]

Sila pôsobiaca na seizmickú hmotu je

$$f = m \frac{dy^2}{dt^2} \quad (2)$$

$$f = k(x - y) + b\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) \quad (3)$$

Pomocou Laplaceovej transformácie prevedieme funkciu času na funkcie komplexnej premennej  $s$ , tj. na tvar :

$$Y(s) = L\{y(t)\} \quad (4)$$

$$F(s) = L\{f(t)\} \quad (5)$$

$$X(s) = L\{x(t)\} \quad (6)$$

Namiesto diferenciálnej rovnice dostaneme rovnicu algebraickú

$$m s^2 Y = F = k(x - y) + bs(X - Y) \quad (7)$$

Danú rovnicu možno upraviť

$$Y = \frac{F}{m s^2} \quad (8)$$

$$F = k \left( X - \frac{F}{m s^2} \right) + bs \left( X - \frac{F}{m s^2} \right) \quad (9)$$

Prenos sústavy je charakterizovaný rovnicou

$$\frac{F}{x} = \frac{k + sb}{1 + \frac{b}{m} \frac{1}{s} + \frac{k}{m} \frac{1}{s^2}} \quad (10)$$

$$A = X s^2 \quad (11)$$

$$\frac{F}{A} = \frac{F}{x s^2} = m \frac{T_1 s + 1}{T^2 s^2 + 2 \xi T s + 1} \quad (12)$$

Výpočet neznámych z rovnice uvedenej vyššie

$$T = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (13)$$

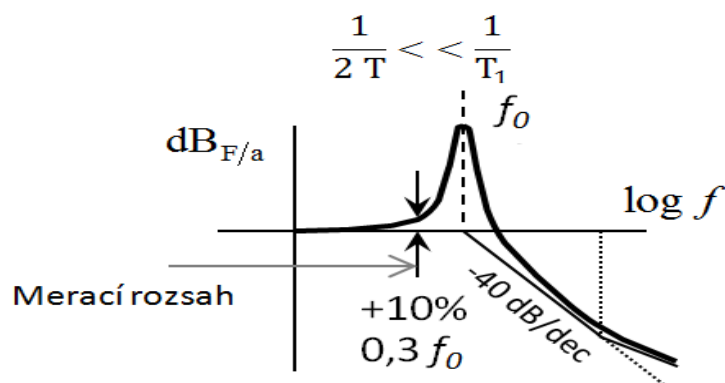
$$f_0 = \frac{1}{2 \pi T} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{k m}} \quad (15)$$

$$T_1 = \frac{b}{k} \quad (16)$$

Sústava je slabo tlmená preto

$$\xi \ll 1 \Rightarrow \frac{b}{k} \ll 2\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (17)$$



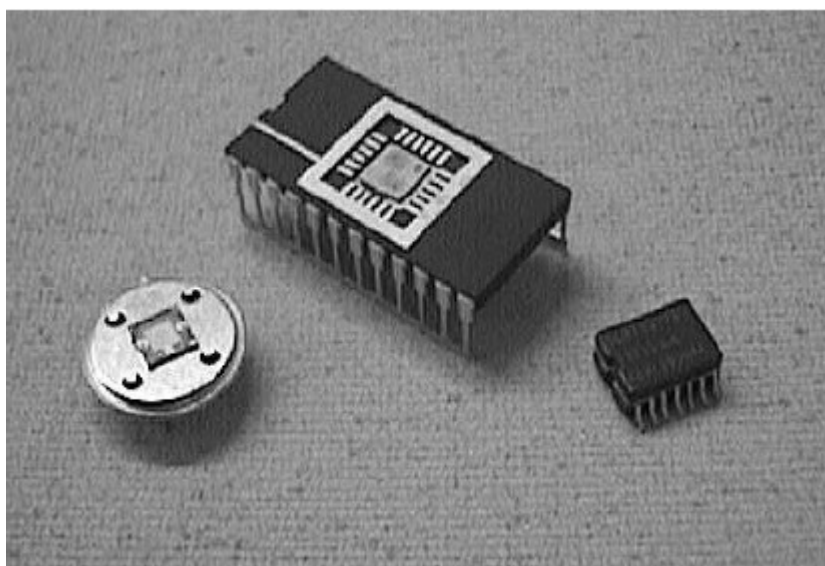
Obr. 4 Znázornenie meracieho rozsahu senzora [Tůma, J., 2009]

Snímač zrýchlenia pracuje v podrezonančnom frekvenčnom pásme.

### 2.3 Základné typy obalov integrovaných obvodov

Z hľadiska nákladov by bolo vhodné ak by snímače boli osadené v štandardne dostupných obaloch integrovaných obvodov. Tie môžu byť rozdelené do troch typov [Beeby, S., a kolektív, 2004].

- Keramika
- Plast
- Kov



Obr. 5 Fotografia typických kovových, keramických a plastových obalov  
[Beeby, S., a kolektív, 2004]

Požiadavky v mikroelektronike kladú dôraz, aby bolo uzavreté integrované obvody v ochrannom puzdre a poskytovalo elektrické spojenie na dosku s vhodným prenosom tepla. Rozhodujúcim faktormi pri návrhu obalov integrovaných obvodov sú:

- Spoľahlivosť ( vplyv vlhkosti a tlaku )
- Tepelný tok
- Ľahká a lacná výroba
- Elektrické vlastnosti ako vedenie odporu, kapacity, indukčnosti

Keramické materiály boli použité v širokej škále typov obalov, aj keď sú drahšie ako plastové. Oproti plastovým bezkonkurenčne vynikajú v rozsahu elektrických, tepelných a mechanických vlastností. Keramické obaly môžu byť hermeticky uzatvorené. Preto ich rozmery sú veľmi malé s veľkým počtom spoľahlivých elektrických prepojení.

Široká škála týchto obalov bola vyrobená zahŕňajúc základný dvoj obal, čipový nosič, ploché balenie a viacvrstvé balenie. Tieto obaly sú používané vo vysoko výkonných aplikáciách, kde zvýšenie nákladov nezohráva dôležitú úlohu. Najčastejšími používanými materiálmi sú :

- Oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ )
- Nitrid hliníka (ALN)

- Oxid berylnatý (BEO)
- Karbid kremíka (SiC)

Pri výrobe keramických obalov sa využívajú dva spôsoby. Prvý spôsob pozostáva zo zmesi keramika a spojiva, ktoré sú sformované pomocou suchého lisovania a neskôr technológiou zapekania sa vytvoria hotové súčiastky. Keramický obal je vo forme sendviča, ktorý tvorí kov v ráme. Medzi týmito súčasťami sú lisované keramické komponenty (základňa a veko). Tieto tri vrstvy držia pohromade hermeticky sklenenými fritmi pri teplotách medzi 400°C a 460°C. Lisované keramické obaly sú lacnejšie, ale ich jednoduchá konštrukcia obmedzuje počet možných elektrických vlastností a prepojení.

Druhý spôsob výroby je založený na viacvrstvovej keramickej štruktúre. Tie sú vyrábané z nepálených vrstiev kremíka, pokovovaného volfrámom a zapekaným pri vysokej teplote približne 1600°C. Obnažené kovové prvky sú elektrolyticky pokované niklom a zlatom. Kovové časti sú kontaktné kolíky. Takáto štruktúra dovoľuje začlenenie vhodných elektrických prvkov do samostatného obalu. Pokovovanie je možné využívať na keramických obaloch natlačením tučného filmu alebo pomocou tenkého filmu. U technológie natlačenia tučného filmu je rozteč čiar asi 150 µm. Nová foto - technológia umožnila znížiť hrúbku čiar a veľkosť medzier na 40 µm a 50 µm. Technológia tenkého filmu umožňuje ešte menšie hrúbky čiar a veľkosti medzier približne 20 µm.

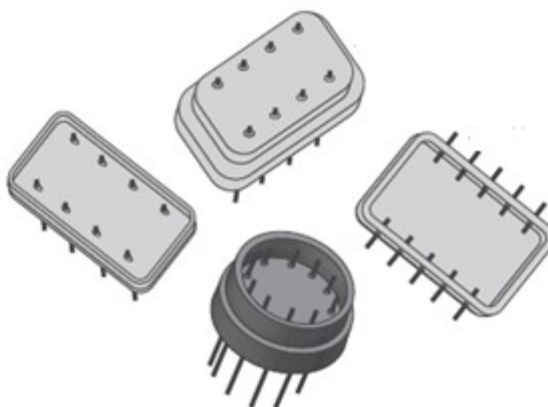
## 2.4 Plastové obaly

Plastové obaly boli vyvinuté za účelom zníženia nákladov za obaly IC. V strede plastového obalu je vodiaci rám, na ktorom je elektrické pripojenie. Vodiaci rám býva zvyčajne zo zliatiny medi, nikel – železo alebo kompozitných pások (napr. Med' zalatovaná nehrdzavejúcou oceľou). Symetria vodiaceho rámu sa získava lisovaním alebo chemickým frézovaním. Poskladaná sústava je uzavretá v plastovom termosetovom obale za použitia lisovacej živice. Tá bola vyvinutá za účelom získania požadovaných vlastností. Tieto vlastnosti zahŕňajú viskozitu, priľnavosť k vodiacemu rámu a nízku hodnotu iónového znečistenia [Beeby, S., a kolektív, 2004].



## 2.5 Kovové obaly

Tento druh je často používaný vo vojenských aplikáciách, pretože poskytujú vyššiu spoľahlivosť. Sú hermeticky uzatvorené zvaraním, spájkovaním, čo zabraňuje zhromažďovaniu vlhkosti a z toho vyplýva spoľahlivosť. Bežne používanými kovmi sú za studena valcované ocele, meď, molybdén, kremík vystužený karbidom hliníka [Beeby, S., a kolektív, 2004].



Obr. 7 Obrázok bežne používaných kovových obalov [Beeby, S., 2004]

## 2.6 Akcelerometre

Tiažové zrýchlenie smerujúce do stredu zeme určuje horizontálnu rovinu. Hodnota tiažového zrýchlenia v našich zemepisných šírkach je  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ . Gravitačné pole Zeme umožňuje meranie náklonu od vodorovnej osi x. Gravitačné pole a pohybové zrýchlenie majú totožné účinky na hmotný bod, preto nie je možné zmerať iba jednu zložku celkového zrýchlenia. Nameraný výsledok je vektorovým súčtom zložiek. Gravitačné pole je možné použiť pre zariadenia v pokoji, prípadne pohybujúce sa rovnomerným priamočiarym pohybom počas merania. Meranie gravitačného poľa sa dá realizovať pomocou pohyblivo zaveseného závažia s potenciometrickým alebo optickým meraním náklonu. Ďalšiu možnosť predstavuje je meranie pomocou hladiny kvapaliny v nádobe. Tento druh merania umožňuje jednoduchý rozklad na vektorový tvar a tiež zaručuje presnosť. Problém nastáva pri snímaní hladiny. Akcelerometre umožňujú meranie tiažového zrýchlenia. Dokážu merať zrýchlenie v jednom alebo vo viacerých smeroch. Akcelerometer je mikroelektronický snímač využívajúci technológiu polovodičového leptania, ktoré umožňuje meranie zrýchlenia vo viacerých smeroch. Ich výhoda spočíva v malých rozmeroch a vo vysokej spoľahlivosti [Hudák, J., a kolektív, 2009].

## 2.7 Piezoelektrické akcelerometre

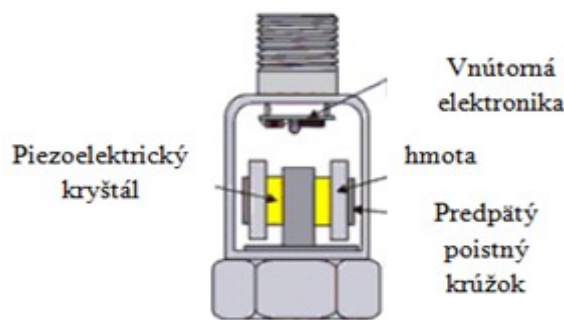
Tento druh akcelerometrov vo svojej konštrukcii používa piezoelektrický materiál, ktorý generuje veľkosť náboja priamoúmerný mechanickému namáhaniu spôsobenému zrýchlením. Veľkosť náboja piezokryštálu sa meria pomocou externej elektroniky so zvýšenou hodnotou vstupnej impedancie alebo často pomocou vnútornej elektroniky, ktorá prevedie náboj na napätie s nízkou impedanciou. Pri spracovávaní signálu stačí jednoduchý vyhodnocovací obvod. Tieto akcelerometre sa nedajú použiť na meranie frekvencií nižších ako 0,1 Hz.

Piezoelektrické akcelerometre sú tvorené dvomi časťami:

- Piezoelektrickým materiálom – senzor merajúci zrýchlenie
- Seizmickou hmotou – konvertuje hodnotu zrýchlenia na silu

Jedna časť piezoelektrického materiálu je spojená s pevnou základňou snímača. Táto časť je označovaná ako seizmická hmota a je ukotvená na piezosnímač. Keď na akcelerometer pôsobí zrýchlenie (t.j. vibrácie, otrasy), generuje sa sila  $F$ , ktorá pôsobí na piezoelektrický materiál a to spôsobí generovanie náboja (napätia na výstupe senzora). Táto metóda vychádza z Newtonovho zákona. Sila je priamoúmerná seizmickej hmotnosti hmoty a pôsobiacemu zrýchleniu. Seizmická hmota má rovnakú hmotnosť, preto veľkosť náboja výstupného signálu je priamoúmerná pôsobiacemu zrýchleniu.

Reálne merania s piezoelektrickými akcelerometrami sú obmedzené. Tento druh senzora dokáže merať zrýchlenie iba v platnom frekvenčnom rozsahu, ktorý vychádza z konkrétnej konštrukcie senzora, pretože citlivosť u niektorých akcelerometrov významne závisí na frekvencii. Senzor z tohto hľadiska sa dá považovať ako dolno-frekvenčná priepust s rezonančnou špicou. Seizmická hmota a piezokeramika tvarujú pružnú hmotu systému, ktorý sa správa ako pružina s vlastnou rezonanciou [Hudák, J., a kolektív, 2009].



Obr. 8 Štruktúra piezoelektrického akcelerometra  
[zdroj: <http://www.avir.sk>]

## 2.8 Piezorezistívne akcelerometre

Tento akcelerometer je druh senzora, v ktorom je použitý piezorezistívny namiesto piezoelektrického materiálu. Po konštrukčnej časti je veľmi jednoduchý, čo umožňuje napojenie senzora v jednoduchých vyhodnocovacích obvodoch. Akcelerometre dokážu merať frekvencie od 0 Hz, tzv. nemenné zrýchlenie. Pre svoju činnosť využívajú zmenu odporu materiálu, ktorý sa prejavuje pri mechanickom namáhaní vyvolanom pôsobiacim zrýchlením. Zmeny odporu na piezomateriály sú merané pomocou plného alebo polovičného Wheatstonovho mostíka. Integrované akcelerometre používajú vyleptanú sieť piezorezistívnych snímačov zapojených do mostíka.

V dnešnej dobe sa najviac používa princíp, ktorý je založený na tom, že vplyvom pôsobiaceho zrýchlenia sa ohýba nosník z piezorezistívneho materiálu. Ohyb spôsobí zmenu odporu, ktorý je neskôr nameraný.

Princípom činnosti rezistívnych akcelerometrov je hmota, ktorá je zavesená na pružine k rámu. Pri pohybe rámu, hmota bude chcieť zostať v pokoji až do času, až kým pružina nedodá hmote silu k pohybu. Veľkosť sily pôsobiacej na pružinu sa rovná meranému zrýchleniu.

Dolná hranica merateľnosti pre tieto akcelerometre je blízka nule. Hornú hranicu pásma definuje prvá rezonančná frekvencia celej mechanickej štruktúry. Ak sa nameraná frekvencia zrýchlenia bude blížiť k rezonančnej frekvencii akcelerometra, dôjde k väčšej meracej chybe. Prekročením rezonančnej frekvencie sa stáva akcelerometer nepoužiteľný.

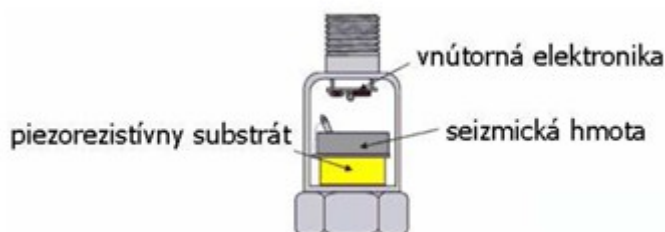
Medzi najväčšie požiadavky na senzor patri citlivosť len v žiadanom smere. Príkladom toho je akcelerometer merajúci osu X, ktorý parazitne meria v osách Y a Z. Tento druh

citlivosti je označovaný ako krížová citlivosť spôsobujúca chybu merania. Je vyjadrovaná ako pomer citlivosti v nepožadovaných smeroch k požadovanému smeru.

Akcelerometre vyskytujúce sa v priemysle sú často prispôsobené na veľkú citlivosť vibrácií a nárazov. Uplatnenie nachádzajú v aplikáciách ako napríklad snímanie nárazu v airbagoch. Ich veľmi dôležitou vlastnosťou je samo testovanie. To sa realizuje v aplikáciách, ktoré sú málo používané a je potrebné vykonať test funkčnosti senzora. To je ľahko realizovateľné tým, že k vychýleniu dôjde pomocou malého elektrického impulzu, ktorým sa simuluje sila pôsobiaca na štruktúru pomocou zrýchlenia. Získaný signál z výstupu môže byť vyhodnotený a podľa toho sa môže vykonať teplotná alebo citlivostná kalibrácia [Hudák, J., a kolektív, 2009].

Medzi hlavné výhody patri :

- Malá veľkosť
- Lineárny výstup
- Stabilný výstup počas rôznych prevádzkových teplôt
- Veľká presnosť
- Nízka cena



Obr. 9 Obrázok piezorezistívneho akcelerometra

[zdroj: <http://www.avir.sk>]

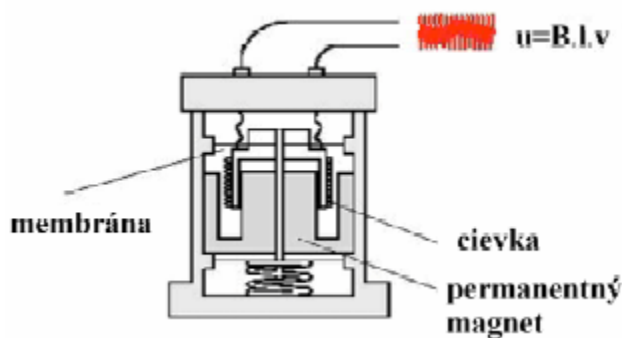
## 2.9 Elektrodynamický akcelerometer

Princíp elektrodynamického akcelerometra vychádza z Faradayovho indukčného zákona. Cievka o dĺžke  $l$  a rýchlosti  $v$  je vodičom pohybujúcim sa v magnetickom poli s indukciou  $B$ . Na jej koncoch dochádza sa indukcií elektrického napätia :

$$U = B \times l \times v$$

kde:

$B$	je magnetická indukcia
$l$	je dĺžka vodiča cievky
$v$	je rýchlosť kmitania



Obr. 10 Princíp funkcie elektrodynamického akcelerometra.

[zdroj: <http://web.tuke.sk>]

Medzi pólovými nástavcami permanentného magnetu je vzduchová štrbina. V poli permanentného magnetu, ktorý vytvára hmotnosť senzora sa pohybuje meracia cievka. V cievke sa pri kmitaní prenáša z meraného objektu na puzdro senzora indukované elektrické napätie, ktoré je úmerné okamžitej rýchlosti. Signál zrýchlenia možno dostať po derivácii signálu rýchlosti [Hudák, J., a kolektív, 2009].

## 2.10 Rotačný akcelerometer

Využitie akcelerometra s inkrementálnym čidlom je výhodnejšie vzhľadom, že nespracováva veľké množstvo neužitočných dát. V stave ustálenia rotačného akcelerometra je jeho signál rovný nule. Zmenou rýchlosti vzniká prechodový jav a na výstupe sa objaví signál.

## 2.11 Kapacitný akcelerometer MEMs

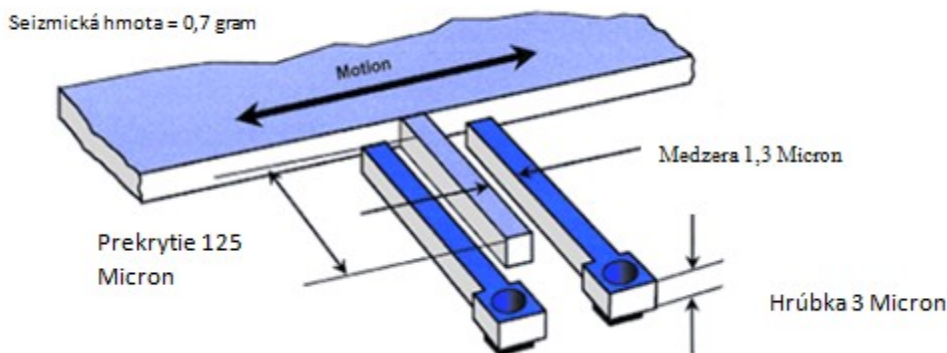
Mechanická štruktúra spolu s vyhodnocovacími obvodmi je zabudovaná na jednom integrovanom obvode vďaka technológiám MEMs. Princípom merania je zmena kapacity

vnútorného integrovaného kondenzátora pôsobením sily vznikajúcej zrýchlením senzorového puzdra.

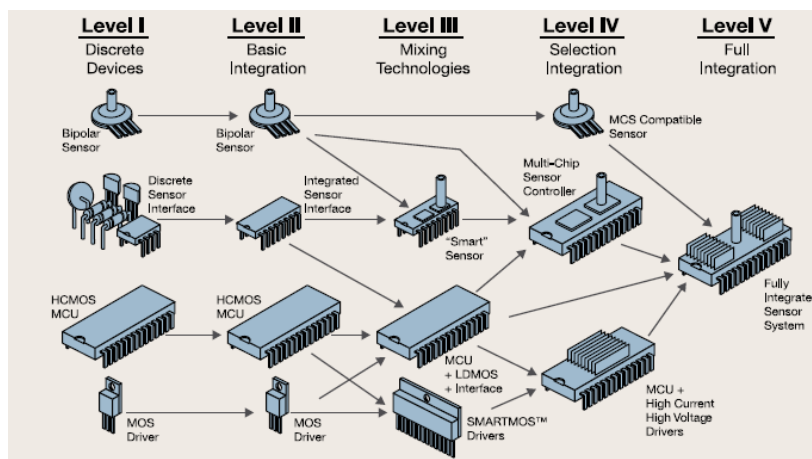
Štruktúra sa skladá z polykryštalického, mikro-mechanického čidla s technológiou BiMOS a integrovaných obvodov pre spracovanie signálu zo senzora. Môžeme merať kladné, záporné, statické a dynamické zrýchlenie.

Mikro – elektro - mechanické systémy (MEMs) je technológia od firmy Freescale, ktorá umožňuje meranie tlaku a zrýchlenia. MEMs senzory zabezpečujú rozhranie pre snímanie, spracovávanie alebo kontrolu okolitého prostredia.

Freescale MEMs senzory sa používajú do veľmi malých elektrických a mechanických komponentov na jednom čipe. Sú kľúčovou zložkou v automobilovom priemysle, v lekárskech prístrojoch, pevných diskoch a mobilných telefónoch [Freescale].



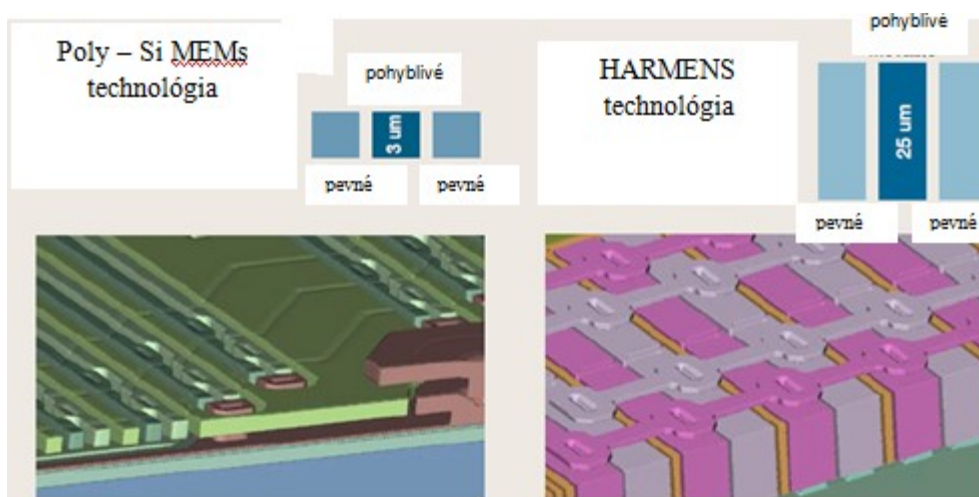
Obr. 11 Obrázok kapacitného akcelerometra MEMs  
[zdroj: <http://www.avir.sk>]



Obr. 12 Obrázok znázorňujúci postupný vývoj technológie MEMs  
[zdroj: [www.freescale.com](http://www.freescale.com)]

## 2.12 Technológia HARMENS

Je to technológia nasledujúcej generácie od firmy Freescale využívaná v aplikáciách snímania airbagu. Airbag patrí k hlavnému ECU (Engine Control Unit) systému, ktorý je nainštalovaný v kabíne automobilu. Pomocou tlmenia HARMENS technológie umožňuje vysoký stupeň odolnosti voči vysokej frekvencií, vysokej amplitúde parazitnej vibrácie. Táto technológia bola zavedená tiež v dvojsose akcelerometri používanom v systéme elektronickej kontroly stability (ESC) pre meranie postranného zrýchlenia automobilu, ktoré dopomáha vodičovi udržať kontrolu nad vozidlom počas nestálych jazdných podmienok. Využitie majú v oblasti automobilovej bezpečnosti ako senzory zrýchlenia, ktoré zisťujú mieru rizika kolízie v predných ako aj bočných airbagoch [Freescale].



Obr. 13 Porovnanie technológie Poly – Si MEMs s technológiou HARMENS  
[zdroj: [www.freescale.com](http://www.freescale.com)]

Freescale MEMS technológia poskytuje nasledujúce výhody:

- hospodárnosť
- malé rozmery
- vysoký výkon

Funkčnosť môže byť integrovaná v rovnakom kremíkovom alebo inom puzdre, čo znižuje počet komponentov a tak prispieva k celkovej úspore nákladov. Sú dve varianty integrovaných mikrosystémov zahŕňajúce monolitickú integráciu a systém in– the-package.

Monolitická integrácia je zahrnutá v zariadeniach MEMS a v integrovaných obvodoch. Systém – in – package zahŕňa MEMS zariadenia a integrovaný obvod v jednom balíku.

### **2.13 Externá sériová zbernica SPI**

Externá zbernica označovaná skratkou SPI (Serial Peripheral Interface) v súčasnosti predstavuje nedeliteľnú súčasť v mnohých digitálnych zariadeniach. Veľká obľúbenosť týchto zberníc spočíva v jednoduchosti implementácie a to po stránke hardwarovej tak aj po programovej stránke. V najjednoduchšom prípade môže prijímaciu stranu zbernice SPI predstavovať bežný posuvný register. Prenosová rýchlosť je pre mnoho účelov viac než dostačujúca. SPI je vybavené hodinovým signálom, pričom jeho frekvencia môže dosahovať až 70 MHz. Bežne pracuje s frekvenciou 10 MHz [Tišnovský, P., 2008].

### **2.14 Vlastnosti zbernice SPI**

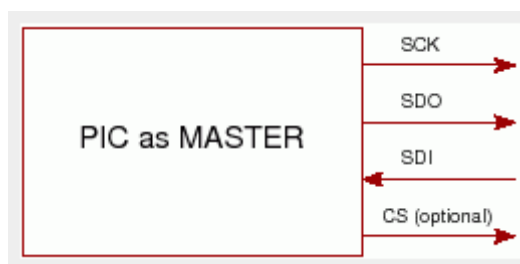
Zbernica SPI predstavuje jednu z foriem sériových externých zberníc slúžiacich pre vzájomné prepojenie dvoch alebo viacerých komunikačných uzlov. Pričom jeden uzol vystupuje v úlohe nazývaného radiča zbernice (master), ostatné uzly pracujú v režime slave. Uzol pracujúci ako master obsahuje generátor hodinového signálu, ktorý je rozvádzaný do všetkých ostatných uzlov, čím je umožnený synchronný prenos dát oboma smermi. Hodinový signál je rozvádzaný vodičom označovaným symbolom SCK. Okrem vodiča s hodinovým signálom sú uzly prepojené dvojicou vodičov označovaných symbolmi MISO (Master In, Slave Out) a MOSI (Master Out, Slave In). Pomocou nich sa obojsmerne (full duplex) prenášajú dáta. Posledným signálom, ktorý sa u tejto zbernice používa je signál SSEL (Slave Select). Slúži k výberu niektorého uzla pracujúceho v režime slave.

Zbernica SPI kvôli jednoduchej implementácii sa používa v mnohých systémoch, napríklad pri komunikácii s niektorými pamäťami EEPROM, A/D a D/A prevodníkmi, hodinami reálneho času (RTC). Pre jednosmernú komunikáciu, pri ktorej sa do uzla iba posielajú či iba čítajú dáta možno použiť posuvný register alebo sérovo zapojenú sadu niekoľkých posuvných registrov. To predstavuje veľmi jednoduchú a lacnú metódu ako za pomoci mikroradiča ovládať okolité zariadenie.



## 2.15 Klady a zápory zbernice SPI

Medzi najväčšiu prednosť zbernice SPI patrí jej jednoduchosť a tým aj ľahká implementácia. Jednoduché je tiež elektrické rozhranie zbernice a prenosový protokol. V podstate SPI nie je nič iné ako niekoľko externých prepojených posuvných registrov, pričom posun je riadený jednotným hodinovým signálom. Jednoduchosť prenosového protokolu vyplýva z toho, že dáta sú prenášané obojsmerne po samostatných vodičoch. Nie je potrebné riešiť prepínanie medzi vysielaním a príjmom ako je to známe u zberníc využívajúce poloduplexný prenos dát [Tišnovský, P., 2008].



Obr. 14 Značenie signálov u zariadení pracujúcich v režime master  
[Tišnovský, P., 2008]

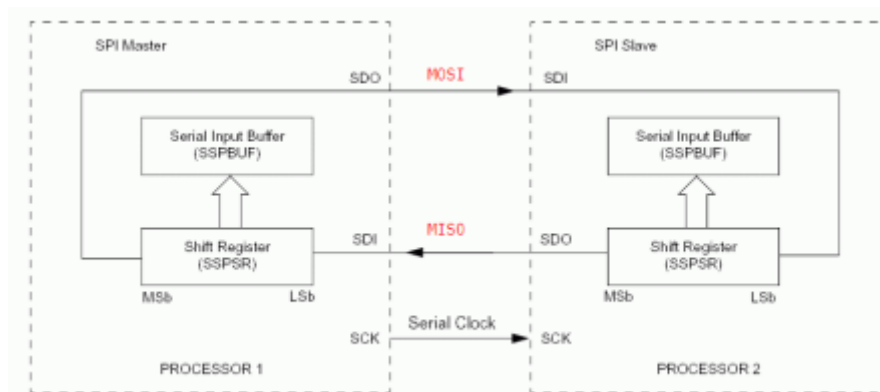
Medzi nevýhody zbernice SPI patrí predovšetkým existencia iba jedného zariadenia, ktoré môže pracovať v režime master. Sice existuje možnosť použitia zapojenia označovaného multiple master, ale to súvisí s použitím zložitejšieho prenosového protokolu. Pomocou SPI je tiež možné prenášať dáta iba na kratšiu vzdialenosť, čo je dané nutnosťou synchronizácie hodinového signálu s prenášanými dátami a neexistenciou signálu typu ACK (acknowledge), ktorým by sa potvrdzoval príjem dát. To by umožňovalo riadiť rýchlosť prenosu dát v prípade, kedy zariadenie nedokáže dáta rýchlo spracovať. Ďalšou nevýhodou u SPI je použitie niekoľkých spôsobov synchronizácie dát hodinovým signálom. Možno použiť obe polarities hodín, synchronizácia na náběžnú alebo zostupnú hranu. Preto veľa mikroradičov obsahuje konfiguračné registre, pomocou ktorých je možné spôsob generovania signálu zvoliť. Poslednou nevýhodou, ktorá pri komunikácii na menšiu vzdialenosť nemusí byť patrná, je nutnosť použitia minimálne štyroch vodičov pre obojsmernú komunikáciu. A to SCK, MISO, MOSI a GND.



Obr. 15 Označenie signálov u zariadení pracujúcich v režime slave  
[Tišnovský, P., 2008]

## 2.16 Princíp komunikácie po zbernici SPI

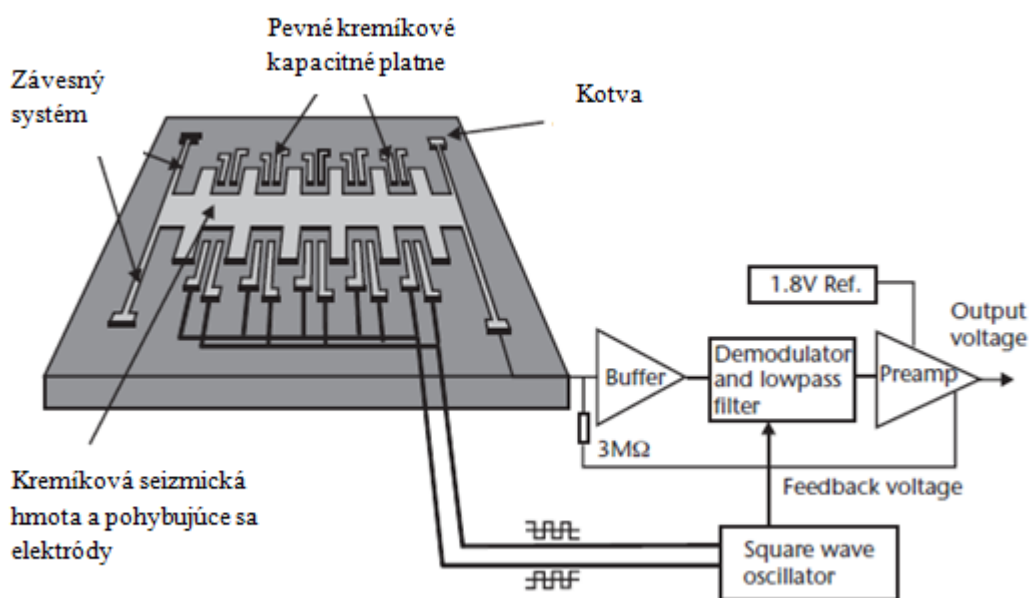
Na obrázku č. 16 je nakreslený spôsob prepojenia dvoch uzlov napríklad mikroradičov pomocou zbernice SPI. Oba uzly obsahujú v najjednoduchšom prípade dva registre. Prvý je dátový záchytný register SSPBUF (Serial Input Buffer) a posuvný register SSPSR (Shift Register). Do registra SSPSR je zapísaný bajt, ktorý bol konkrétne prijatý, ale ešte nebol spracovaný mikroradičom. Tento register slúži, aby pri konkrétnej obsluhu nedošlo k strate dát. Posuvný register SSPSR slúži súčasne k vysielaniu, tak aj príjmu jedného bitu z ôsmich prenášaných. Každý posuv obsahu tohto registra doprava znamená, že sa pošle vysunutý bit na pin SDO, prípadne na vodič MOSI, pokiaľ sa jedná o typ uzla master. Logická hodnota prečítaná na pine SDI poprípade MISO je zapísaná do najnižšieho bitu posuvného registra. Jeden z uzlov je pracujúci v režime master, druhý v režime slave. Vysielanie a prijímanie sa realizuje v rovnaký okamih.



Obr. 16 Princíp prepojenia dvoch zariadení pomocou rozhrania SPI. Naľavo je zariadenie nakonfigurované v režime master vpravo slave [Tišnovský, P., 2008]

### 3 Výber vhodných akcelerometrov pre danú úlohu

Analog Devices patrí k najznámejším firmám, ktoré sa zaoberajú výrobou akcelerometrov pod označením ADXL. Tieto zariadenia sú predovšetkým zamerané pre použitie v automobilovom priemysle. Prvým predávaným zariadením bol akcelerometer pod označením ADXL50 v roku 1991. Bol založený na mikro – technológii so snímajúcou elektronikou integrovanou na jednom čipe. Fungoval na analógovo-silovom držaní rovnováhy uzatváracej slučky riadiaceho systému. Dynamický rozsah mal  $\pm 50g$  s maximálnou hodnotou zrýchlenia bez poškodenia senzora 2000g, čo umožňovalo nasadenie do systému airbag [Beeby, S., a kolektív, 2004].

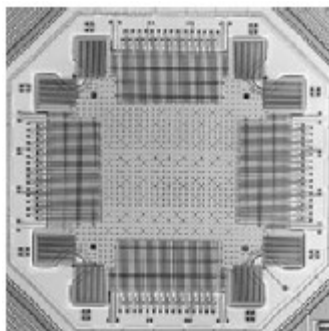


Obr. 17 Zjednodušená bloková schéma akcelerometra ADXL50 [Beeby, S., 2004]

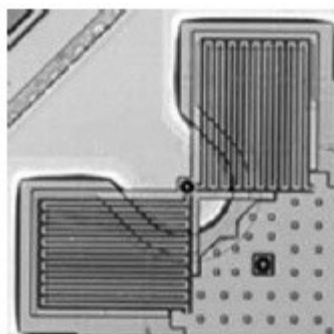
Pevné elektródy senzora sú excitované pomocou štvorcovej vlny 1 MHz, ktorá je rovná v amplitúde s fázovým posuvom  $180^\circ$ . Tlmiace napätie je demodulované a zosilnené prístrojovým zosilňovačom na hodnotu 1,8 V. Výstupný signál pre 0g je +1,8V. Výstupné kolísanie signálu  $\pm 0.95V$  je pre zrýchlenie v rozmedzí  $\pm 50g$ .

Akcelerometer s označením ADXL202 patrí do skupiny akcelerometrov, ktoré dokážu snímať dve osi. Merajú zrýchlenie pozdĺž dvoch rovinných osí. Seizmická hmota je

pripevnená pomocou štyroch párov polykremíkových pružín pripevnených štvoricou kotviacich bodov. To umožňuje sa voľne pohybovať v dvoch smeroch pod vplyvom pôsobenia statického alebo dynamického zrýchlenia. Seizmická hmota má pohyblivé nožičky, ktoré radiálne vyčnievajú na všetky štyri strany. Nachádzajú sa tam pevné nožičky pre usporiadanie kondenzátorov, ktoré merajú pre os x a os y.



Obr. 18 Dvojosí akcelerometer ADXL202 : Seizmická hmota sa môže pohybovať v dvoch smeroch má integrované nožičky na všetkých štyroch stranách  
[Beeby, S., a kolektív, 2004]



Obr. 19 Závesný systém akcelerometra ADXL 202 [Beeby, S., a kolektív, 2004]

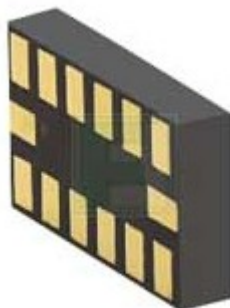
### 3.1 Akcelerometer MMA 7456

Pre danú úlohu bol zvolený akcelerometer MMA 7456 od firmy Freescale [12]. Patrí do skupiny MEMs akcelerometrov určený na meranie síl v dôsledku pádu,

nárazu, polohovania a vibráciám. Uplatnenie nachádza u spotrebnej elektroniky, ktorá vyžaduje rýchlu odozvu, vysokú citlivosť, nízku spotrebu. Akcelerometer MMA 7456 dokáže komunikovať pomocou SPI a I2C. Obsahuje nasledovné parametre:

- napájacie napätie je 2,4 V až 3.6 V
- rozmery 3mm x 5mm x 1mm
- rozsah merania zrýchlení  $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$  v osách x, y, z
- rozsah pracovných teplôt  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+85^{\circ}\text{C}$
- maximálne zrýchlenie do zničenia senzora 5000g

Používa sa v zariadeniach na stabilizáciu obrazu, v hard diskoch na detekciu pádu počítača.



Obr. 20 Obrázok akcelerometra MMA 7456 [zdroj: [www.freescale.com](http://www.freescale.com)]

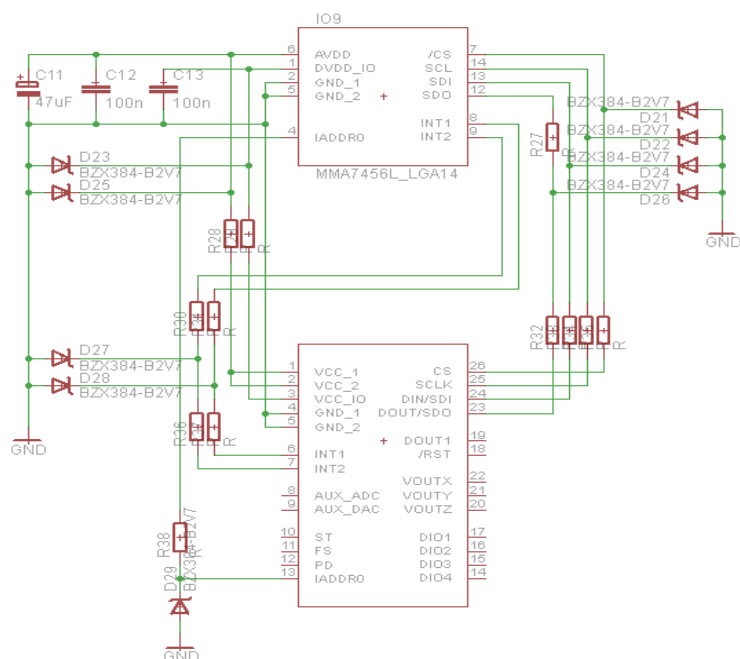
### 3.2 Návrh riešenia systému pre záznam pohybu odpružených hmôt.

Pre komunikáciu medzi doskou obsahujúcou Microprocesor PIC a digitálnym akcelerometrom je treba spraviť medzi obvod, ktorý upravuje veľkosť napájacieho napätia a jednotlivých dátových signálov. Schéma (obr.22) je vytvorená v programe Eagle. Medzi akcelerometrom a mikroprocesorom je použitá SPI komunikácia, pri ktorej je treba napájacích 5V z mikroprocesora stabilizovať na hodnotu 3V pomocou Zenerových diód D21 – D26, pre nezničenie obvodov akcelerometra. Takisto je potrebné stabilizovanie napájacieho napätia.

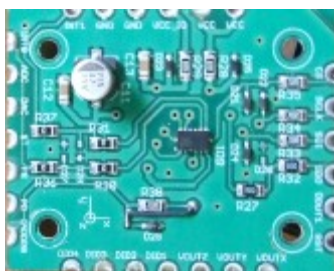
### 3.3 Riešenie návrhu plošného spoja

Pre návrh plošného spoja som využil freeware verziu programu Eagle od firmy CadSoft. Eagle je editor pre návrh dosiek plošných spojov. Bola vytvorená iba jedna doska,

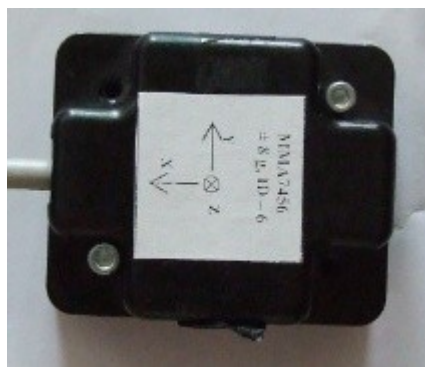
ktorá slúži na prepojenie akcelerometra s doskou, kde sa nachádza mikroprocesor PIC spolu s možnosťou komunikácie pomocou zbernice CAN.



Obr. 22 Návrh dosky plošného spoja pre zber dát z akcelerometra v programe Eagle.



Obr. 23 Vyrobená doska plošného spoja pre osadenie akcelerometra.



Obr. 24 Doska pre osadenie akcelerometra spolu s prídavným modulom umiestnená v krabičke.

## 4 Fourierová transformácia

Fourierová transformácia patrí k základným postupom spracovania signálov. Transformuje signál z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Niektoré signály je vhodné prezentovať v časovej oblasti, iné zase vo frekvenčnej oblasti ako napríklad frekvenčné spektrá, pretože poskytujú zreteľnejšiu informáciu o zložení signálu. Spektrum je výhodné zvlášť pre signály, ktoré sú zložené z niekoľkých harmonických signálov o rôznej frekvencii. Tieto frekvencie sú rušené náhodným šumom. V časovej oblasti musí byť harmonický signál zložený aspoň z jednej periódy vzorkou, zatiaľ čo vo frekvenčnej oblasti stačí zaznamenať amplitúdu, frekvenciu a fáz.

Teória Fourierovej transformácie sa opiera o Fourierové rady pre periodické funkcie. Najzákladnejšia verzia Fourierovej transformácie je pre neperiodický signál. Fourierová transformácia, ktorá sa aplikuje na vzorkovaný signál a objav rýchlej Fourierovej transformácie (FFT – Fast Fourier Transform) poskytli technikom veľmi účinný nástroj pre skúmanie signálov [apfyz.upol.cz, 2003].

### 4.1 Definícia priamej Fourierovej transformácie

Obečná Fourierová transformácia vyobrazuje signál ako funkciu spojitého času ako premennú z oboru reálnych čísiel na funkciu spojitej uhlovej frekvencie rovnako ako premennú z oboru reálnych čísiel. Inými slovami je signál z časovej oblasti transformovaný do frekvenčnej. Táto transformácia je integrálna s exponenciálnym jadrom  $\exp(-j\omega t)$ , kde  $\omega = 2\pi f$  je uhlová frekvencia v rad/s a  $j = \sqrt{-1}$  je komplexná jednotka. Transformácia funkcie  $x(t)$  sa vypočíta podľa vzorca :

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (18)$$

Funkcia  $x(t)$  sa nazýva originál a výsledok transformácie  $X(\omega)$  je obraz. Podmienkou existencie transformácie funkcie  $x(t)$  je, aby transformovaná funkcia bola po častiach spojitá s konečným počtom bodov nespojitosti a aby integrál funkcie  $|x(t)|$  bol konečný.

Matematický význam integrálu spočíva v hodnotení miery zhody funkcie (signálu)  $x(t)$  s komplexnou funkciou  $\exp(-j\omega t)$  na intervale od  $-\infty$  do  $+\infty$ .

Geometrickým modelom tejto komplexnej funkcie je jednotkový vektor (fázor) s počiatkom v počiatku komplexnej roviny. Pre  $\omega > 0$  rotuje v smere pohybu hodinových ručičiek uhlovou rýchlosťou  $\omega$ . Pre  $\omega < 0$  je smer rotácie opačný. Uhol  $-\omega t$  reprezentuje fázu vektora, ktorého koncový bod leží na jednotkovej kružnici.

## 4.2 Implementácia FFT (Fast Fourier Transform)

Fourierová transformácia je vyjadrením časovo závislého signálu pomocou harmonických signálov, obecné teda funkcia komplexnej exponenciály. Slúži na prevod signálov z časovej oblasti do oblasti frekvenčnej. Signál môže byť v spojitom alebo diskretnom čase [7].

Pokiaľ spracovávame vzorky signálov či spektrá z konečného intervalu, pracujeme v diskretnom čase. Pre výpočet spektra v diskretnom čase použijeme metódy z numeriky pod názvom Diskrétna Fourierová Transformácia (DFT), ktorá je zadefinovaná vzťahom.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}; \quad k=0,\dots,N-1 \quad (19)$$

Výpočet DFT podľa definičného vzťahu vyžaduje  $N^2$  komplexných súčinov a  $N^2$  komplexných súčtov.

Po roku 1965 bol popísaný veľmi efektívny algoritmus, ktorý počíta DFT, tzv. rýchlu Fourierovu transformáciu (FFT – Fast Fourier Transform), ktorý vyžaduje len  $\frac{N}{2 \log_2(N)}$  komplexných súčinov a  $N \log_2(N)$  komplexných súčtov.



Algoritmus FFT pracuje na rekurzívnom princípe delenia vstupnej postupnosti na menšie celky o veľkosti  $\frac{N}{2}$ , teda postupnosť párných členov a nepárnych členov. Z tohto vyplýva, že počet vzoriek vstupnej postupnosti musí byť o veľkosti mocniny dvoch. Rekurzívne rozdeľovanie postupnosti prebieha až do doby, kedy je vstupná postupnosť rozdelená na dve časti o dvoch vzorcoch. Pre tieto krátke postupnosti sa vypočíta DFT a výsledky krátkych postupností sa opäť zložia.

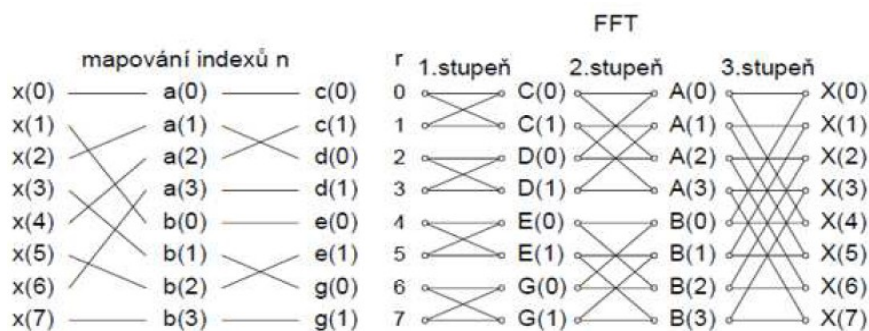
S ohľadom na výklad daného postupu pri výpočtoch podľa rovníc sa zavedie substitúcia.

$$W_N^{nk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (20)$$

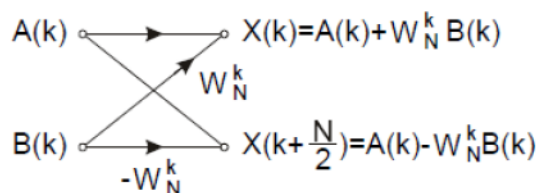
Vzťah pre DFT potom bude nadobúdať tvar:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{nk}; \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (21)$$

Počet výpočetných operácií môžeme znížiť použitím vhodného algoritmu, ktorý využíva periodicitu činiteľa  $W_N^{nk}$ . Delenie postupnosti na menšie celky je ukázané motýľkovým algoritmom pre  $N = 8$  [Comtel.cz].



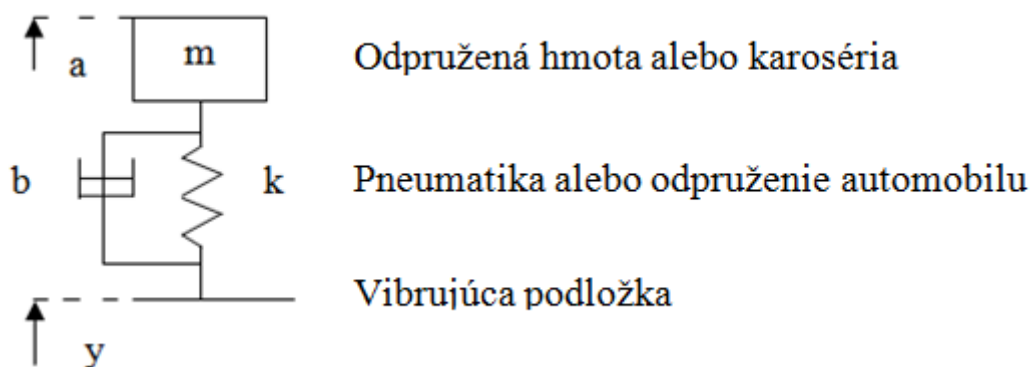
Obr. 25 Motýľkový algoritmus pre delenie na menšie úseky pre  $N=8$   
[Comtel.cz]



Obr. 26 Výpočet v jednotlivých krokoch FFT je realizovaný podľa diagramu  
[Comtel.cz]

### 4.3 Matematicko – fyzikálny model automobilu

Jednou z aplikácií snímača zrýchlenia je hodnotenie nerovnosti povrchu vozovky alebo obecné kinematického budenia zotrvačnej hmoty, ktorej pohyb je meraný akcelerometrom. Je preto treba riešiť úlohu, u ktorej je známe zrýchlenie zotrvačnej hmoty. Chceme určiť pohyby podložky, ku ktorej je zotrvačná hmota pripevnená cez pružinu s tlmičom. Ku numerickému riešeniu tejto úlohy použijeme Fourierovú transformáciu.



Obr. 26 Schematické znázornenie odpruženia automobilu

V obrázku  $a$  reprezentuje zrýchlenie. Parametre  $m$ ,  $k$ ,  $b$  sú vstupné parametre. Hmotnosť je označená v obrázku ako  $m$ ,  $k$  je tuhosť pružiny a  $b$  tuhosť tlmiča. Nerovnosť vozovky je vyznačená parametrom  $y$ .

Rovnica pohybu je popísaná nasledovné:

$$m a(t) = -b \left( \int a(\tau) d\tau - y' \right) - k * \left( \iint a(\tau) d\tau - y \right) \quad (22)$$

Riešenie pre  $y$

Laplaceová transformácia  $FT \{a(t)\} = A(j\omega)$ ,  $FT \{y(t)\} = Y(j\omega)$

$$m A(j\omega) = -b \left( \frac{A(j\omega)}{j\omega} - j\omega Y(j\omega) \right) - k \left( \frac{A(j\omega)}{-\omega^2} - Y(j\omega) \right) \quad (23)$$

Riešenie pre  $Y(j\omega)$

$$Y(j\omega) = \frac{m A(j\omega) + \frac{b A(j\omega)}{j\omega} - \frac{k A(j\omega)}{\omega^2}}{j\omega b + k} \quad (24)$$

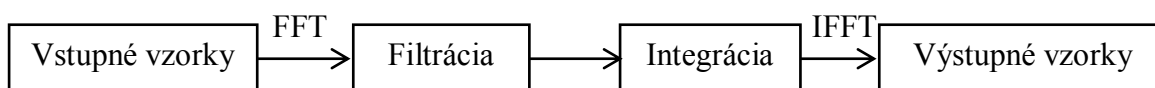
Za predpokladu  $A(j0)$ , že nahradia  $b$ ,  $k$  a  $A(j\omega)$  číselnými hodnotami, počítanými  $Y(j\omega)$  a vykonaním inverznej transformácie  $Y(j\omega)$

$$y(t) = FT^{-1} \{Y(j\omega)\} \quad (25)$$

Vzorce sú pre Fourierovú transformáciu pre spojitý čas. Meranie časového priebehu zrýchlenia je však zaznamenávané ako postupnosť vzoriek. Výpočtové vzorce tento fakt nezmenia.

#### 4.4 Postup prepočtu zrýchlenia na výchylku s korekciou na drift akcelerometra

Ďalšou úlohou je prevod záznamu zrýchlení na výchylky s hornopriepustnou filtráciou. K tomuto výpočtu použijeme opäť Fourierovú transformáciu. To znamená, že hornopriepustná filtrácia a dvojité integrácie bude realizovaná vo frekvenčnej oblasti.



Obr. 27 Postup výpočtu hodnôt zrýchlenia na hodnoty výchylky

Vstupné dáta sú prezentované hodnotami zrýchlenia v určitých časových okamihoch.

$$a_n; n = 0, 1, \dots, N - 1; (N = 2^m) \quad (26)$$

Fourierová transformácia načítaných dát.

$$A_k = FT \{a_n\}; k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (27)$$

Pre reálnu vstupnú postupnosť je výstupná postupnosť zložená z komplexných čísiel, pričom prvé číslo výslednej postupnosti  $A_0$  je reálne a pre ostatné čísla postupnosti symetrické okolo indexu  $N/2$  musí platiť, že sú navzájom komplexne združené

$$A_k = A_{N-k}^*; k = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (28)$$

Drift akcelerometra je v pásme 0 až 0,5 Hz, čo odpovedá prvým desiatim členom Fourierovej transformácie.

Integrácia vo Fourierovej transformácii sa vykonáva delením  $j\omega$ . Fourierov obraz rýchlosti sa získa výpočtom podľa tohto vzorca

$$V_k = \frac{A_k}{j\omega}; V_{N-k} = V_k^*; k = 1, \dots, N/2 \quad (29)$$

Fourierov obraz výchylek sa vypočíta opakovaným delením  $j\omega$ , preto

$$Y_k = -\frac{A_k}{\omega^2}; Y_{N-k} = Y_k^*; k = 1, \dots, N/2 \quad (30)$$

Hodnoty pre  $V_0$  a  $Y_0$  sa predpokladajú, že sú rovné nule.

Horno - priepustný filter, ktorý slúži na korekciu driftu akcelerometra. Filozofiou je vynulovať prvých desať načítaných hodnôt a desať hodnôt od konca. Pri nulovaní hodnôt  $A_k$  musí byť zachovaná podmienka komplexnej združenosti medzi symetrickými číslami.

$$A_0 = 0 \quad (31)$$

$$A_1 = A_{n-1} = 0 \quad (32)$$

$$\text{až} \\ A_{n0} = A_{N-n0} = 0 \quad (33)$$

$$A_{N/2} = 0 \quad (34)$$

$$\omega = 2 \pi k \frac{f_s}{N}; \quad k = n_0 + 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (35)$$

$$Y_k = - \frac{A_k}{\omega^2} \quad (36)$$

$$y_n = FT^{-1} \{Y_k\} \quad (37)$$

## 4.5 Voľba programovacieho jazyka

Názov MATLAB vznikol z anglického matrix laboratory. MATLAB bol napísaný, aby poskytoval jednoduchý prístup k matematickým knižniciam vyvinutými v projektoch LINPACK a EISPACK. Pôvodne bol určený pre operačný systém UNIX a to sa prejavuje vo veľmi jednoduchom základnom komunikačnom rozhraní pomocou príkazového riadku. MATLAB je vysoko výkonný jazyk určený pre technické výpočty. Umožňuje integrovať výpočty, vizualizáciu a programovanie do jednoducho použiteľného prostredia. Ide o interaktívny systém, ktorého základným dátovým poľom je dvojrozmerné pole. Táto vlastnosť spolu s množstvom zabudovaných funkcií umožňuje jednoduché riešenie technických problémov hlavne tých, ktoré vedú k maticovej alebo vektorovej formulácií. Dokáže vytvárať výpočetné aplikácie ako aj samotné výpočty v omnoho kratšom čase ako je to v klasických jazykoch C alebo FORTRAN [Dušek, F., 2010].

## 4.6 Vlastnosti programovacieho jazyka MATLAB

MATLAB je integrované prostredie, ktoré je určené na vedecko-technické účely, simulácie a paralelné výpočty. Základná charakteristika MATLABU súvisí s objektmi, ktoré považuje za pole a matice. Tieto prvky nemusia byť vždy len čísla alebo premenné, ale aj zložitejšie štruktúry ako napríklad obrázky. Jeho výkonnosť je rozširovaná vďaka nadväzujúcemu softvéru, ktoré tvoria predovšetkým súbory programu tzv. “toolboxy” [MATLAB, 2011].

## 4.7 Návrh vyhodnocovacieho softvéru

Vyhodnocovací softvér je vytvorený v programovacom prostredí MATLAB. Zdrojový kód vychádza z matematických rovníc a fyzikálneho princípu, ktorý bol opísaný v predchádzajúcej kapitole. Program využíva naprogramované funkcie, ktoré MATLAB má v sebe zakomponované. Hlavne Fourierová transformácia (FFT) ako aj inverzná Fourierová transformácia (iFFT). Zdrojový kód taktiež rieši problematiku driftu senzora, ktorým je akcelerometer. V programe je možnosť ručného nastavenia počtu vynulovaných hodnôt od začiatku ako aj konca bloku. Veľkosť premennej, ktorá túto funkciu vykonáva závisí od výstupného grafu, ktorý je potrebné vyhladiť.

Zdrojový kód hornopriepustného filtra v programovacom prostredí MATLAB.

$$A(1) = 0; \tag{21}$$

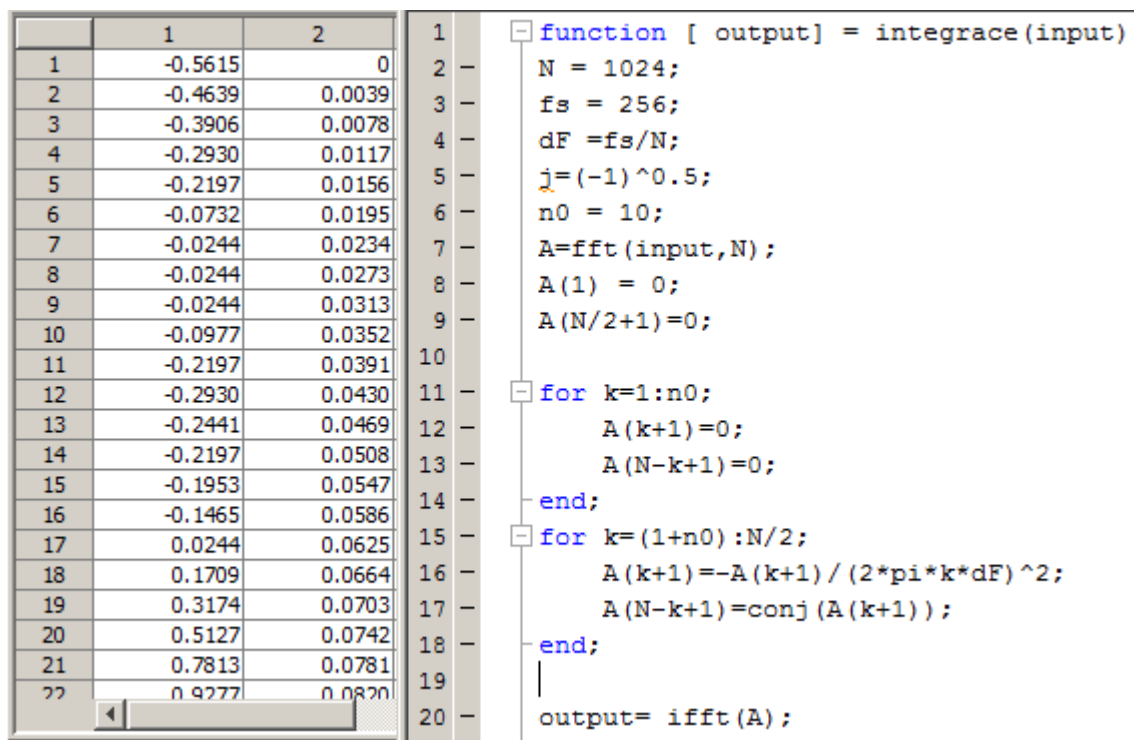
$$A\left(\frac{N}{2} + 1\right) = 0; \tag{22}$$

$$\text{for } k = 1:n_0; \tag{23}$$

$$A(k + 1) = 0; \tag{24}$$

$$A(N - k + 1) = 0; \tag{25}$$

Hodnoty zrýchlenia z programu Excel sú načítané do poľa, kde prebiehajú postupné matematické operácie podľa predtým stanoveného algoritmu. Zdrojový kód prevádza hodnoty zrýchlenia na hodnoty výchyliek.



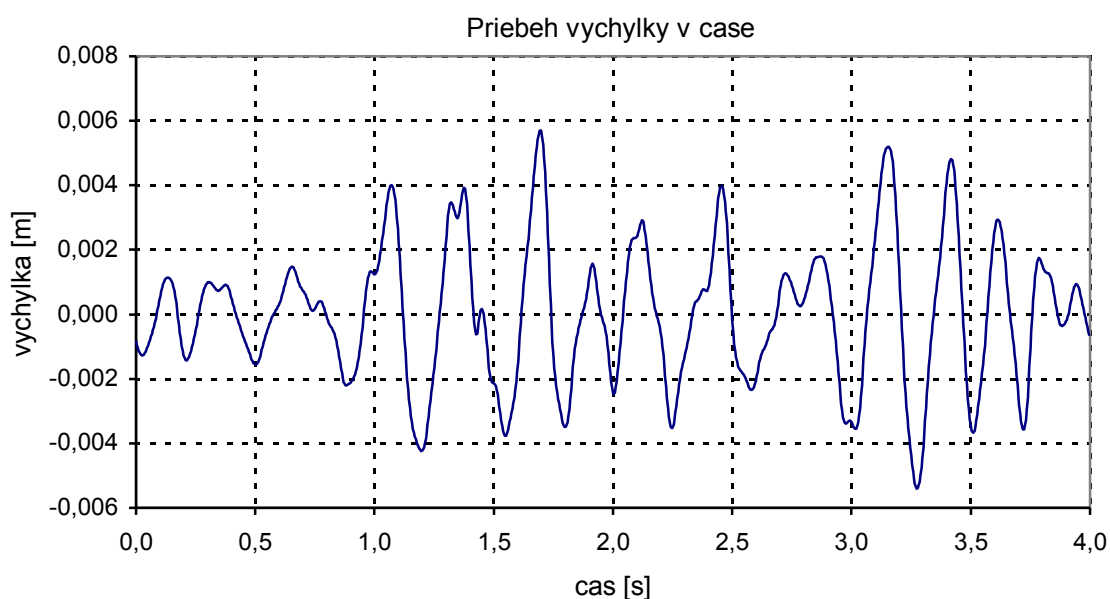
Obr. 28 Realizácia výslednej vyhodnocovacej aplikácie v prostredí MATLAB

#### 4.8 Overenie metódy integrácie

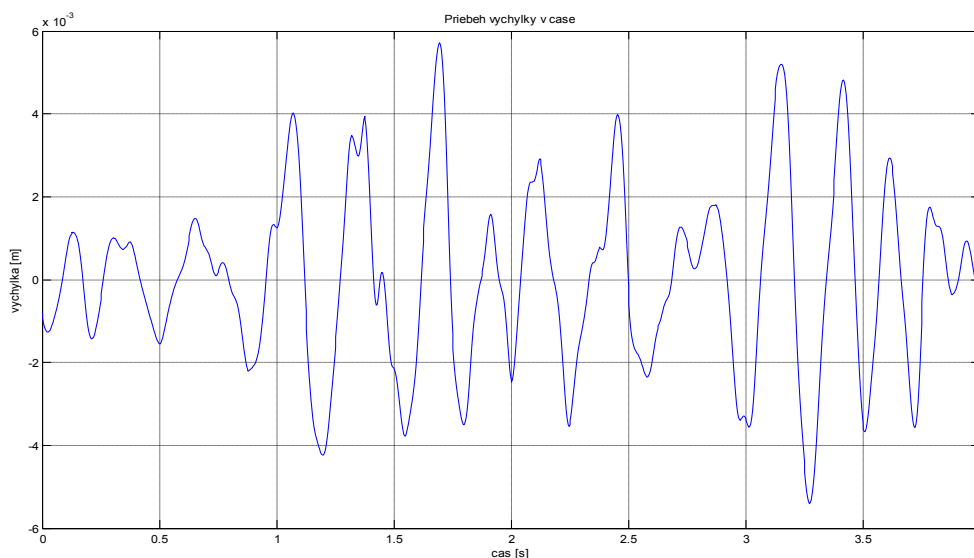
Na správne skontrolovanie fyziológie spomínaného vyhodnocovacieho softvéru, ktorý je vytvorený pomocou „m – filu“ v programe MATLAB sa porovnávajú priebehy výsledných grafov. Ako porovnávací softvér slúži program Signal Analyser vytvorený pánom Prof. Ing. Jiřím Tůmou, CSc. Oba programy používajú dáta uložené v programe Excel. Spracovávajú 1024 hodnôt a postupne prevádzajú matematické operácie.

## 4.9 Program Signal Analyser

Patrí do skupiny softvéru, ktorý slúži na analýzu signálov uložených v rôznych druhoch formátov. Pre vyhodnotenie a porovnanie správne navrhnutého algoritmu sa v programe dáta spracovávali v časovom organizéry. Hodnoty sa načítavali z programu EXCEL s dĺžkou 1024 hodnôt. Aby hodnoty zrýchlenia mohli byť prevedené na hodnoty výchyliek, museli byť podrobené dvojitej integrácii.



Obr. 29 Analýza načítaných dát po spracovaní v programe Signal Analyser



Obr. 30 Analýza načítaných dát po spracovaní v programe MATLAB

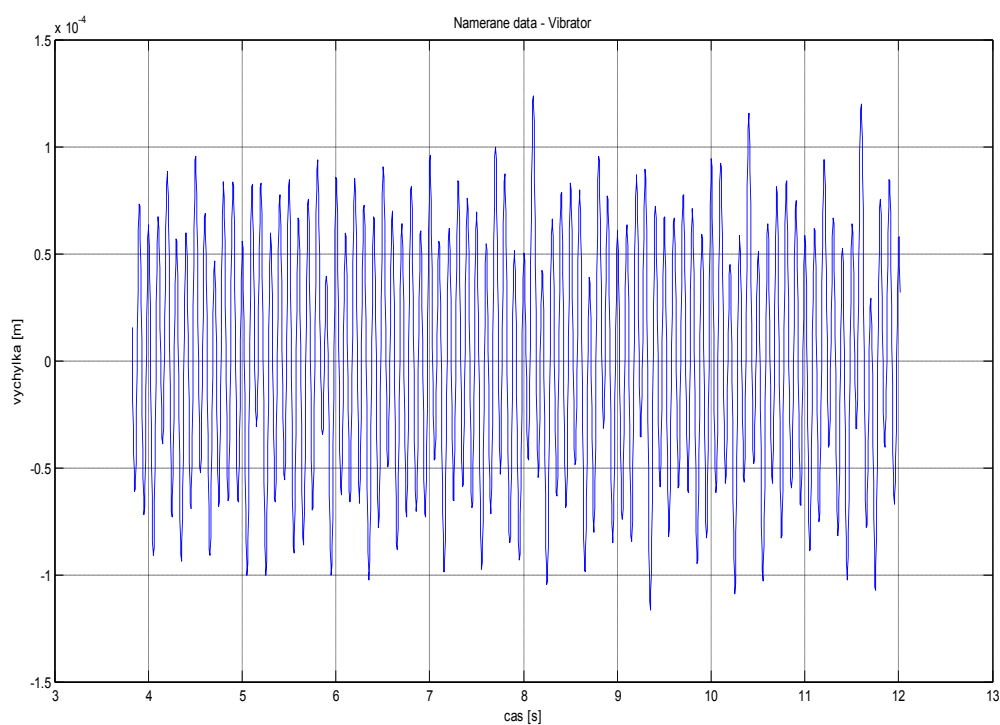


Meracie zariadenie sa odskúšalo na priemyselnom vibrátore.



Obr. 31 Krabička s akcelerometrom umiestnená na priemyselnom vibrátore

Namerané dáta boli exportované do kancelárskeho balíka EXCEL, kde dáta sa museli preusporiadať tak, aby mohli byť použité vo vyhodnocovacej aplikácii. Kancelársky balík EXCEL obsahoval hodnoty os x, y, z s časom, v ktorom boli namerané. Vyhodnotenie nameraných dát bolo realizované pomocou vykreslenia grafu v programovacom prostredí MATLAB.



Obr. 31 Analýza nameraných dát z vibrátora pomocou programu MATLAB

## **5 Záver**

Štúdiom podkladov a materiálov potrebných pre vypracovanie bakalárskej práce som sa zoznámil s rôznymi typmi senzorov merajúcich zrýchlenie. Oboznámil som sa z ich štruktúrou a princípom podľa, ktorého merajú hodnoty zrýchlenia. Svojimi vlastnosťami ma zaujali akcelerometre MEMs, ktoré vďaka neustálemu vývoju napredujú a sú nasadzované v bežne dostupných aplikáciách. Materiály ohľadom témy akcelerometrov sa dajú stiahnuť voľne z internetu.

Po konzultácií a spoločnej dohode som zvolil potrebné súčiastky pre zostavenie zariadenia snímajúceho nerovnosti. Jednalo sa o dosku plošného spoja, kde bude osadený akcelerometer. Bolo potrebné znížiť napájacie napätie zo 6V na 2,4V. Pri navrhovaní dosky plošného spoja som musel prejsť rôzne druhy katalógov daných súčiastok, aby som mohol správne navrhnuť schému zapojenia. Akcelerometer s doskou komunikuje pomocou SPI komunikácie. Dáta sa z plošného spoja do počítača dostávajú pomocou zbernice CAN.

Ďalším bodom bakalárskej práce bolo vyhotovenie vyhodnocovacieho softvéru. Ten mal za úlohu prevádzať namerané hodnoty zrýchlenia na hodnoty výchylky. Výstupom z tohto programu je graf závislosti veľkosti výchylky v čase. V programe sa pracuje s Fourierovou transformáciou ako aj s inverznou Fourierovou transformáciou. To ma viedlo k použitiu skriptovacieho programovacieho jazyka, ktorý má už hotové naprogramované funkcie, ktoré je len treba správne použiť. Výsledné grafy ako aj celá aplikácia je vytvorená v programovacom jazyku MATLAB.

Správnosť naprogramovaného algoritmu som overil v programe Signal Analyser, ktorý umožňuje spracovávať signály. Pre ukážku som vygeneroval grafy, ktoré spracovávajú 1024 hodnôt uložených v programe Excel.

Funkčnosť zariadenia, ktoré meria vibrácie bola odskúšaná na priemyselnom vibrátore. Namerané dáta boli uložené do kancelárskeho balíka EXCEL. Súbor obsahoval hodnoty zrýchlení v ose x, y, z namerané v čase. Odtiaľ boli vložené do programovacieho prostredia MATLAB a tam následne vyhodnotené. Výsledok vyhodnotenia bol priebeh výchylky v čase.

## Zoznam použitej literatúry

- [Beeby, S., a kolektív, 2004] Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., White, N. *MEMs Mechanical Sensors*. vyd. London: Artech House, 2004. [cit. 2011-04-14] ISBN 1-58053-536-4
- [Dušek, F., 2010] Dušek, F., *MATLAB a SIMULINK úvod do používání*, vyd. Univerzita Pardubice, 2000. I SBN 80-7194-273-1
- [Farana, R., Smutný, L., Víteček, A., Vítečková, M., Wagnerová, R.]Farana, R., Smutný, L., Víteček, A., Vítečková, M., Wagnerová, R. *Doporučení pro psaní odborných textů z oblasti automatizace a informatiky*. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 2008, 80 str. ISBN 978 - 80 - 248 - 1925 – 9
- [Tůma, J., 2009] Tůma, J. *Diagnostika strojů*, 1. vyd. Ostrava : Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009 [cit. 2011-03- 25]. 138 s. ISBN 978-80-248-2116-0.
- [Tůma, J., 2009] Tůma, J. *Signal processing*, 1. vyd. Ostrava : Skripta VŠB - TU Ostrava, 2009. 156 s. ISBN 978-80-248-2114-6. (in English)
- [Hudák, J., a kolektív,2009] Hudák, J., Lipovský, P., Draganová, K., *Akcelerometre* [online], TUKE - Košice ,2009 Dostupný z WWW:  
<<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/175>>
- [apfyz.upol.cz, 2003] *Diskrétní Fourierova transformace* [online]., Univerzita Palackého Olomouc, 11.prosince 2003 [cit. 2011-04-15], Dostupný z WWW:  
<<http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>>
- [Krehel', R., Fabian, S., 2007] Krehel', R., Fabian, S., *Prezentácia vývoja laboratórneho modelu pre meranie, vyhodnocovanie, modelovanie a simuláciu vibrácií v prevádzke výrobných systémov* [online]. 2007, TUKE Košice [cit. 2011-4-22]., ISSN 1335-7972 Dostupný z WWW:  
<<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf07/3-str-89-91.pdf>>
- [Analog devices] Analog devices [online]., [cit. 2011-03-12] Dostupný z WWW:  
< <http://www.analog.com/en/index.html> >
- [Avir] Avir [online]., [cit. 2011-02-08], Dostupný z WWW:  
< <http://www.avir.sk/download/rob07.pdf> >
- [Freescale] Freescale [online]. 2009 [cit. 2011-3-12].Dostupný z WWW:  
<[www.freescale.com/sensors](http://www.freescale.com/sensors)>

[Comtel.cz] *Implementace FFT na obvode FPGA* [online]., České vysoké učení technické v Praze [cit. 2011-04-29]. Dostupný z WWW: <[www.comtel.cz/files/download.php?id=5061](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=5061)>

[MATLAB, 2011] *MATHWORKS - MATLAB and Simulink for Technical Computing*. 2011 [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/>>

[Andrejašič, M., 2008] Andrejašič, M., *MEMS ACCELEROMETERS*, University of Ljubljana 2008 [cit. 2011-02-12]. Dostupný z WWW: <[http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007\\_2008/MEMS\\_accelerometers-koncna.pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-koncna.pdf)>

[Tišnovský, P., 2008] Tišnovský, P., *Externí sériová sběrnice*. 30.12. 2008 [cit. 05.13. 2011]. Dostupný z WWW: <<http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>>

## **Zoznam príloh**

Príloha A – obsahuje schémy vytvorené v programe EAGLE

Príloha B – obsahuje vyhodnocovací softvér napísaný v programe MATLAB